Capítulo 9

EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Diego O. Ferraro

IFEVA-Cátedra de Cerealicultura. Facultad de Agronomía (UBA)/CONICET. Email: ferraro@agro.uba.ar.

Resumen. A las funciones ecosistémicas útiles para alguna actividad humana (i.e., que proveen un servicio) se las conoce como servicios de los ecosistemas. Uno de los desafíos actuales, en términos de manejo y estudio de los ecosistemas, es cuantificar la provisión de estos servicios. Una aproximación habitual desde la Economía Clásica, es usar valores monetarios para calcular el costo de reemplazo de los servicios provistos por cada sistema. Sin embargo, a menudo este enfoque económico de la valoración ambiental resulta insuficiente para predecir características ecosistémicas tales como la estabilidad a largo plazo o la degradación de bienes naturales. Una aproximación alternativa a la monetaria es la valoración física a través de la cuantificación de los flujos de energía en un sistema manejado. En este trabajo se presentan los fundamentos teóricos y algunos elementos operativos de la evaluación emergética de los ecosistemas manejados. La emergía (con eme, por "embody energy") es la cantidad de trabajo (o energía útil) de una clase (energía solar) que se necesita transformar, directa o indirectamente, para obtener un bien o un servicio. La cuantificación emergética reconoce los límites físicos de la explotación de los ecosistemas, a la vez que permite evaluar en una moneda común (emjoules solares) el balance entre entrada y salida de materia, energía y capital en un ecosistema.

ORIGEN DEL ESTUDIO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

La estructura y las funciones de los ecosistemas dependen del tipo de especies de plantas y animales que los componen (estructura biológica) y de variables abióticas que regulan la manera en que recircula la materia y la energía dentro y fuera de sus límites (Odum 1984). A las funciones ecosistémicas que son útiles para alguna actividad humana (i.e., que proveen un servicio) se las conoce como servicios de los ecosistemas (Zhang et al. 2007). En una de las primeras aproximaciones a su estudio se los definió como condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales, y las especies que forman parte de ellos, sostienen y satisfacen la vida humana (Daily 1997). Con el paso de los años, esta primera definición se fue ampliando y se dejó de lado la diferenciación entre ecosistemas naturales y manejados para dar paso a conceptos más amplios. Así, se definió a los servicios ecosistémicos como el grupo de procesos ecológicos y funciones propias de los ecosistemas que benefician a las poblaciones humanas (MA 2005). Los beneficios provistos incluyen a procesos que mantienen la vida humana y de otros organismo vivos (como la polinización, la purificación de agua y la regulación del clima), las condiciones estéticas (como la serenidad, la belleza y la inspiración cultural), la preservación de opciones para el futuro (como la conservación genética y de la diversidad de especies) y la producción de bienes (como la madera para leña, alimentos, fibras) (Daily 2000, Kremen 2005). La diferencia entre función (e.g., productividad primaria) y servicio (e.g., rendimiento cosechable) hace que un servicio ecosistémico pueda ser producto de dos o más funciones ecosistémicas, mientras que en otros casos una sola función ecosistémica (i.e., proceso físico, químico o biológico que contribuye al mantenimiento de un ecosistema) contribuye a dos o más servicios ecosistémicos (Turner et al. 2003). Más allá de las definiciones cualitativas, uno de los desafíos actuales en término de manejo y estudio de los ecosistemas es pasar a una visión cuantitativa en la evaluación de los servicios de los ecosistemas (o valoración ambiental).

VALORACIÓN AMBIENTAL

Si bien la discusión acerca de la dimensión que otorga valor a los bienes y servicios es un tema central en el pensamiento económico, la dimensión ecológica de esta valorización es mucho más reciente (Costanza et al. 1997). En términos de Economía Clásica, la primera aproximación fue incluir las externalidades asociadas a los resultados de la actividad humana sobre los ecosistemas o incluso calcular el valor de reemplazo de los servicios provistos por cada sistema (Solow 1986). Como resultado de este abordaje aparece la idea de que el factor capital, vinculado a la explotación de un ecosistema, debe incluir dos formas tradicionales como el capital industrial (i.e., máquinas, infraestructura, insumos no durables) y capital humano (i.e., mano de obra) y una nueva forma de capital: el capital natural que integra a la cuenta capital el precio del impacto de sistema productivo sobre el ambiente y los recursos (e.g., el impacto de las extracciones, la eliminación de desperdicios) (Zhang et al. 2007). Si bien esta valoración reconoce explícitamente la vinculación entre la provisión de servicios ambientales y el proceso económico, su principal limitación reside en que limita el estudio de la funcionalidad ecosistémica en términos estrictamente monetarios (Lomas et al. 2008). Es decir que el enfoque económico de la valoración ambiental, a través de la eficiencia económica, es insuficiente para predecir características de los ecosistemas como pueden ser la estabilidad en el largo plazo o la degradación física de bienes naturales (i.e., capital natural) que pueden ser parcialmente reemplazados por cambios tecnológicos (i.e., mano de obra, insumos) (Solow 1997, Stiglitz 1997). Estas limitaciones han llevado en los últimos tiempos a buscar otras dimensiones para valorar la provisión de servicios ambientales. Los esfuerzos hechos en el marco de la Evaluación Ambiental del Milenio (MA 2005), han permitido redescubrir el papel de la física sobre los conceptos de costo y valor, y la posibilidad de analizar los ecosistemas bajo las implicancias de las leyes de la termodinámica (Jorgensen y Fath 2004).

ENERGÍA Y AGRICULTURA MODERNA

Las aproximaciones analíticas al estudio de los ecosistemas son válidas tanto para ecosistemas naturales como para los ecosistemas manejados, entre los cuales los agroecosistemas están muy representados tanto en extensión como en intensidad de uso de recursos externos (Tilman et al. 2002). Un agroecosistema es un ecosistema en donde su estructura se ha modificado (por lo general, simplificado) para que cumpla con la función de provisión de alimentos o fibra (Pimentel 1984). Para entender cómo puede relacionarse la termodinámica y la provisión de servicios ecosistémicos es necesario plantear las alteraciones que implica la instalación de un sistema agrícola sobre ese flujo de energía. Los sistemas agrícolas son sistemas abiertos y disipativos. Es decir que consumen energía para crecer y mantenerse, estableciendo un flujo de materia y energía con su entorno (Odum 1984). En el caso de un sistema natural, el ingreso de energía está basado por completo sobre la radiación solar. Los componente del sistema encargados de fijar está energía son los productores (i.e., las plantas), que son los organismos que fotosintetizan. Este ingreso de energía circula a través de una serie de transformaciones jerárquicas que incluyen a los demás componentes de la red trófica, comenzando por los consumidores hasta los descomponedores (i.e., organismos que transforman la materia orgánica en formas que puedan ser reutilizadas por las plantas). De esta manera, es posible cerrar el ciclo de circulación de energía (producción-consumo-reciclado-nueva producción) y disponer fuera de la zona donde se desarrollan los ciclos de vida de los organismos a la materia que ya no pueda ser reutilizada y que actuara impidiendo el normal funcionamiento de los ciclos vivos (Figura 1). En consecuencia, y a través de millones de años, los sistemas naturales han sido capaces de los procesos de formación de suelo y deposición de material fósil que es el origen de la energía que usa la sociedad actual (Jorgensen y Nielsen 1996). Este funcionamiento basado sobre el uso de energía solar, reciclaje y disposición de los desperdicios (fósiles y minerales) es cambiado de manera abrupta cuando estudiamos los ecosistemas manejados (incluyendo los agroecosistemas). En los ecosistemas manejados, la función de producción ya no depende sólo de la energía solar, sino que está basado sobre un flujo lineal, en un solo sentido, desde los recursos fósiles de la litosfera hacia el consumo y la generación de desechos (excedente) (Figura 1). A diferencia de los sistemas naturales, la tasa de aumento de la materia no reciclable (i.e., desperdicios en los sistemas manejados) se amplifica tanto por la ausencia relativa del componente de descomponedores como por el exceso de tamaño del componente de consumo (Figura 1).

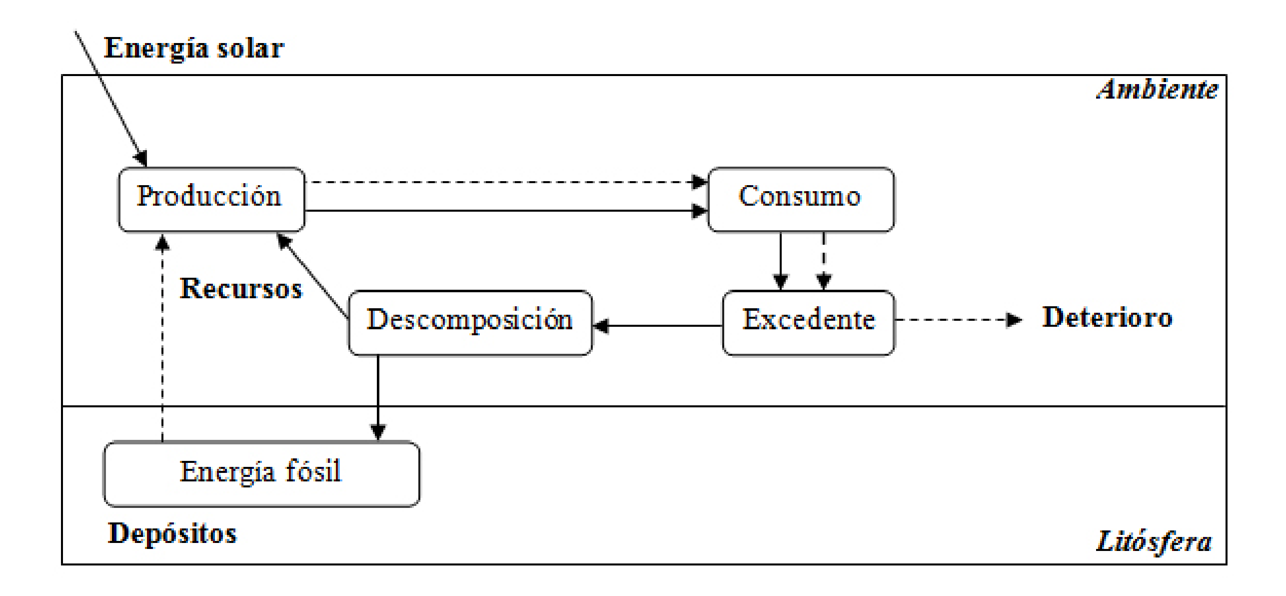


Figura 1. Flujos de energía en un sistema natural (líneas llenas) y en un sistema agrícola (líneas punteadas). Los cuadrados representan las transformaciones energéticas de los recursos usados en cada uno de los sistemas (adaptado de Wall 2002).

TERMODINÁMICA Y FUNCIONAMIENTO ECOSISTÉMICO: LA EXERGÍA

A medida que un sistema se aleja del equilibrio termodinámico con su ambiente, donde es incapaz de experimentar espontáneamente algún cambio de estado, su entropía (i.e., la parte de la energía que no puede utilizarse para producir un trabajo) aumenta y disminuye su estabilidad debido a que una menor parte de la energía permanece dentro de los limites del sistema para mantener su estructura (Giampietro et al. 1992, Wall 2002). En términos estructurales, estos cambios se pueden evidenciar en una menor complejidad o diversidad de componentes, una menor estructura física (biomasa), menos redes (ciclos) y menor información incorporada al sistema (Jorgensen y Fath 2004). Un ejemplo de una condición alejada del equilibrio puede darla un cultivo de maíz, que es una comunidad biológica totalmente improbable en términos de abundancia y distribución de su biota. Sin embargo, elevados aportes externo de energía por parte del Hombre reemplazan las funciones y estructuras de un sistema complejo y permiten que este sistema exista en muchas partes del mundo y asegure valores elevados de biomasa cosechable (Giampietro et al. 1992, Tilman 1999). Es por esto que la agricultura, desde el punto de vista del balance energético, puede entenderse como un proceso que intenta revertir la tendencia natural de los ecosistemas a incrementar la cantidad de energía disipada (i.e., entropía), impidiendo el retorno de esta energía al sistema. Es decir que la agricultura, organiza el sistema biológico de manera tal que sea posible mantener en el tiempo su estructura y funcionalidad (Odum 1989, Giampietro et al. 1992, Jorgensen y Nielsen 1996).

Cuando se evalúa la transferencia de energía entre componentes de un sistema (e.g., el camino de la energía solar y los insumos para lograr un rendimiento cosechable) siempre se pierde energía en cada una de las conversiones. Como se dijo anteriormente, la parte de esa energía que no se pierde se utiliza para estructurar el sistema y a medida que aumenta el flujo aumenta la complejidad del sistema (Hammond 2007, Jorgensen 2007, Ulgiati et al. 2007). Se produce así la paradoja de que, si bien la energía que se transfiere desde sistemas simples a sistemas complejos es cada vez menor, la energía necesaria para la construcción de los sistemas de niveles de organización complejos es cada vez mayor (Merkle y Kaupenjohann 2000, Brown y Ulgiati 2004). Este hecho lleva a pensar que la energía tiene distintas calidades y que la capacidad de hacer trabajo útil (o de prestar servicios) de una unidad de energía depende de la complejidad del sistema que la contiene. Por ejemplo, no es lo mismo la capacidad de hacer trabajo de 1 joule aportado por un trozo de madera, de carbón o de un generador eléctrico. Para diferenciar a la energía según su capacidad de hacer un trabajo, la Física incorporó el concepto de exergía. La exergía es la cantidad máxima de trabajo útil que puede producir un sistema o flujo de materia hasta llegar a estar en equilibrio con su ambiente de referencia (Szargut et al. 1988). Retomando el camino de la energía en un sistema, puede afirmarse que en el balance energético, las entradas ("input") y las salidas ("output") son iguales (i.e., primera ley de la termodinámica), mientras que el balance exergético muestra que la calidad de la energía es continuamente degradada (por la generación de entropía) durante las transformaciones físico-químicas (segunda ley de la termodinámica) (Starkermann 1988, Bakshi 2002, Dewulf y Van Langenhove 2005).

Las fuentes de entrada de energía útil (exergía) a un sistema agrícola son la energía solar, los recursos del ambiente (tanto renovables como no renovables) y los insumos requeridos en el proceso productivo (combustibles, fertilizantes, pesticidas, semillas). Para que este sistema sea eficiente en el uso de la exergía, debería maximizar la entrada de exergía y canalizarla, en mayor medida, a la producción de bienes aprovechables (e.g., cosecha y servicios ecosistémicos). Sin embargo, en los sistemas de producción reales hay fuentes de ineficiencia. Algunos ejemplos pueden ser una mala elección de la fecha de siembra, del genotipo, de la densidad de siembra de un cultivo o un bajo nivel de control de adversidades como las plagas o las malezas. Estas ineficiencias, entonces, no sólo disminuyen la calidad de los procesos (por más costo a igualdad de obtención del producto) sino también amenazan la integridad del sistema porque toda exergía que no puede canalizarse por el sistema productivo hacia la producción de biomasa o hacia la provisión de un servicio ecosistémico necesariamente realizará algún trabajo en el ambiente. Como se ha dicho antes, el bajo desarrollo del componente de reciclado en los sistemas modernos resulta en un flujo libre de exergía hacia el ambiente (deterioro) (Figura 1) que, al no ser canalizado a través de ningún componente del sistema, puede llevar a la ocurrencia de reacciones químicas o procesos físicos sin control que usualmente percibimos como deterioro ambiental (e.g., calentamiento global, destrucción de la capa de ozono, erosión del suelo).

TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: EL TRABAJO DE LOS ECOSISTEMAS MEDIDO EN UNA MONEDA COMÚN

En los últimos años, la estimación de la eficiencia de los procesos a través de la exergía ha permitido identificar mejor los beneficios ambientales y económicos de las tecnologías de producción (Cornelissen 1997) a partir del concepto relacionado de emergía (Odum 1996). La emergía es la cantidad de trabajo (exergía) de una clase que se necesita transformar, directa o indirectamente, para obtener un bien o un servicio. (Odum 1996). Para expresar la magnitud de emergía sobre una base común, la clase de energía usada como referencia es la energía solar. Así, la cuantificación se realiza en emjoules solares (sej) lo que permite una más fácil y significativa comparación de

los flujos y las variables de estado dentro y entre sistemas (Tilley y Swank 2003). Para entender la base común sobre la cual se pueden referir los flujos de exergía es necesario entender que en la naturaleza, la transformación de energía en un ecosistema está organizada de forma jerárquica. En la base de este orden jerárquico se requiere una determinada cantidad de joules para formar un joule de materia orgánica. Luego, muchos joules de materia orgánica permiten obtener un joule de combustible fósil, muchos joules de combustible fósil son necesarios para obtener un joule de energía eléctrica y así sucesivamente (Brown y Ulgiati 2004). En está jerarquía energética, la energía solar es la energía de más amplia disponibilidad, pero la más diluida (i.e., la de menor capacidad de hacer trabajo) y cada flujo de energía y materia (incluido el flujo de capital) puede ser definido en términos de radiación solar (i.e., emjoules solares) requerido directa e indirectamente para crear otra forma de energía disponible (exergía). De esta manera, la síntesis emergética da una imagen comprensible de las contribuciones ambientales a un producto o servicio (Rótolo et al. 2007) debido a que en una misma unidad es capaz de integrar el flujo de materia, energía y capital (Odum 1996).

INDICADORES TERMODINÁMICOS DE PROVISIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

La evaluación en términos emergéticos del uso de insumos y recursos económicos es relativamente fácil, aunque en el caso de los recursos naturales se requiere un esfuerzo mayor para obtener los valores de los flujos de materia y energía y sus respectivos factores de conversión a flujos de emergía. Para ello se recurre a estadísticas y estudios sobre la cantidad de bienes y servicios utilizados en un sistema. Sin embargo, para transformar los flujos de materia, energía y capital en emergía expresada en una moneda común (como los emjoules solares) se necesita información adicional. Este factor adicional es la transformidad, que se define como la emergía de un tipo requerida para hacer una unidad de energía de otro tipo (Brown y Ulgiati 2004). Por ejemplo, si se necesitan 4000 emjoules solares para generar un joule de madera, la transformidad de esta madera es de 4000 emjoules solares por joules (abreviado sej/j) (Brown y Ulgiati 2004). Es decir que los valores de transformidad para distintos bienes y servicios son el resultado de analizar el proceso de producción de cada bien y están compilados en fuentes bibliográficas a las que se recurre para realizar los inventarios emergéticos (Odum 2000, Odum et al. 2000, Ortega 2000).

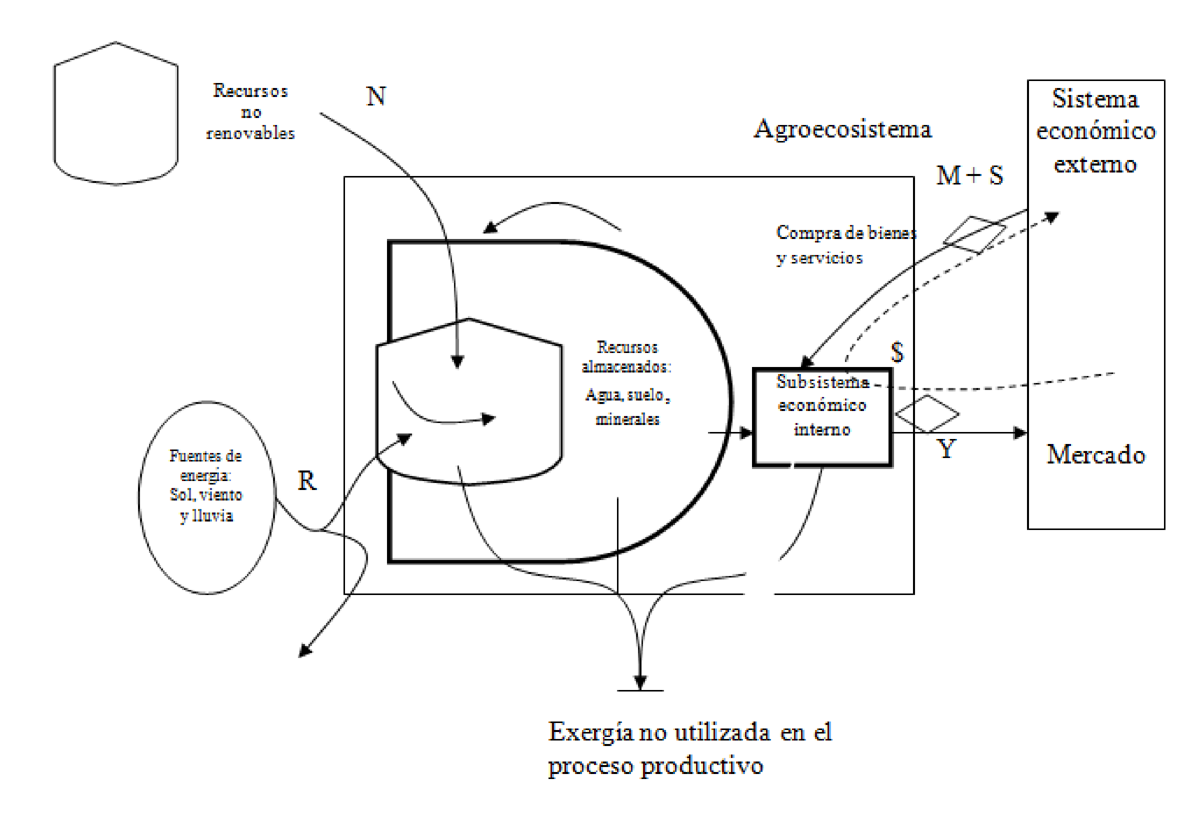


Figura 2. Diagrama de la interfase ecológica-económica de un agroecosistema (Modificado de Odum 1996). Las líneas llenas representan energía, materiales o información. Las líneas punteadas representan flujos de capital. Los rombos representan transacciones. Las letras indican flujos usados para el cálculo de diversos índices (ver Tabla 2 para la descripción de los flujos N, R, M + S, Y).

Por ultimo, la integración del flujo de capital al sistema se hace a través de la conversión de los pagos en moneda en unidades de emergía. El valor se expresa en solar emjoules/$, representa la cantidad de emergía que en un sistema se puede adquirir con una unidad de capital y se calcula dividiendo el uso total de emergía de un país o una región por su producto bruto (Odum 1996). Este valor dependerá de la cantidad de emergía que se incluye en la economía de una nación o región y también de la cantidad de dinero circulante (Brown y Ulgiati 2004). Esta simple relación emergía/dinero permite evaluar el aporte de servicios que se aportan en unidades monetarias al sistema y así integrar en un flujo común (emjoules solares) los aportes de materiales y energía desde el medio físico y desde el sistema económico externo (Figura 2). Las actividades principales para llevar adelante una evaluación emergética se detallan a continuación.

Establecer límites y hacer diagramas de componentes y flujos de emergía y capital

Esta actividad es necesaria para organizar las relaciones entre los componentes principales y los procesos. El resultado es un diagrama usando un lenguaje simbólico específico, tal cual se muestra en la Figura 2.

Inventario de uso de recursos

Es la organización de los diferentes flujos en tablas de evaluación emergética (Tabla 1). Para ello se utilizan valores de conversión de cada uno de los recursos utilizados en sej (emjoules solares). Es decir que para cada flujo de materiales o energía, existe un valor específico de sej, que representa la exergía incluida en el producto utilizado más la utilizada para procesarlo y extraerlo del sistema natural (i.e., definición de emergía). Para realizar este inventario, se consultan fuentes bibliográficas de evaluaciones emergéticas (Odum 1996, Odum 2000, Odum et al. 2000, Ortega 2000).

Cálculo de índices y diagramas de flujo representando los procesos estudiados

El inventario del punto anterior permite calcular relaciones entre flujos para calcular índices de funcionamiento del sistema (Tabla 2) y hacer recomendaciones y evaluación de los agroecosistemas.

Tabla 1. Ejemplo de tabla de evaluación emergética. La columna de notas refiere a las fuentes bibliográficas para los valores de transformidad de cada fila.

Nota	Item	Unidad	Transformidad	Emergía solar
1	1	$j.año^{-1}.ha^{-1}$	sej/j	$sej.año^{-1}.ha^{-1}$
2	2	$g.año^{-1}.ha^{-1}$	sej/g	$sej.año^{-1}.ha^{-1}$
3	3	$\$.año^{-1}.ha^{-1}$	sej/$	$sej.año^{-1}.ha^{-1}$
…	…	…	…	…

Tabla 2. Índices y variables a calcular mediante el inventario emergético (ver Figura 2 para ubicar los flujos en el sistema).

Nombre del índice	Expresión
Flujo de emergía renovable	R
Reservas endógenas no renovables	N
Flujo de emergía externa	M + S
Flujo total de emergía (U)	M + S + R + N
Renovabilidad de la emergía	R / U
Dependencia de economía externa	(M + S) / U
Emergía por unidad de área	U / ha
Emergía "per capita"	U / habitantes
Relación emergía: rendimiento (EYR) (cociente entre la emergía de los productos dividido por la emergía de las entradas ("inputs") que viene desde afuera del sistema.	Y / (M + S)
Relación de emergía invertida (EIR) (cociente entre la emergía de los ingresos ("input") que provienen del sistema económico externo divida por la emergía de los insumos no valorizados económicamente.	(M + S) / N
Índice de presión ambiental (ELR) (cociente entre la emergía no renovable y la emergía renovable.	(N + M + S) / R
Relación de intercambio de emergía (EER) (cociente entre la emergía que el sistema entrega a la economía externa dividida por la emergía recibida por la venta de los productos.	Y / [($).(sej/$)]
Flujo de capital por intercambio del producto	$
Relación emergía:capital (sej/$) (cociente entre la emergía total consumida por una economía dividido el producto bruto interno de la misma.	$sej.año^{-1}$ / PBI ($\$.año^{-1}$)
Indicador de sustentabilidad emergética (cociente entre la contribución de un proceso a la economía por unidad de impacto sobre el ambiente.	EYR / ELR

CONCLUSIONES

El análisis de la funcionalidad de los agroecosistemas a través de la cuantificación de la exergía utilizada vía insumos más la energía necesaria para extraerlos del ambiente (i.e., emergía) aporta una idea real de la eficiencia de los procesos y la posibilidad de mantener el funcionamiento del sistema en el largo plazo (i.e., sustentabilidad). La idea sería que los sistemas de bajo retorno emergético o de alta dependencia del uso de recursos naturales, serán aquellos que estén utilizando de forma más intensa los servicios ambientales, con el riesgo de que esta intensidad pueda afectar el stock o la tasa de provisión de cada uno de los servicios. A pesar de sus ventajas, el análisis emergético ha recibido algunas críticas, en particular de parte de los economistas, por el hecho de ignorar la valoración humana de los bienes y servicios (Kumar y Kumar 2008). Sin embargo, la cuantificación de emergía apunta a proveer un valor ecocéntrico de los productos y procesos ecológicos (Hau y Bakshi 2004). De esta manera, es posible ir mas allá de las limitaciones artificiales del sistema socio-económico, y reconocer las intrincadas relaciones entre la sociedad humana y la biosfera (Ferreyra 2001). Además, cuantificar la exergía libre y no incorporada al sistema agrícola puede dar una idea del potencial de generar procesos físicos sin control en el ambiente. Estos procesos pueden alterar la estructura del sistema (e.g., erosión, contaminación, extinción), dando también lugar a alteraciones funcionales como puede ser la provisión de servicios ecosistémicos que son usados internamente por los sistemas agrícolas (Pimentel et al. 1997). Por ultimo es necesario remarcar que la aproximación desde la termodinámica a la evaluación de los servicios ecosistémicos no excluye necesariamente a la manera más tradicional de estudio del deterioro, y con mayor o menor

detalle, es capaz de estimar tasas de procesos claves (e.g., ciclado de nutrientes, polinización de cultivos, control del ciclo del agua, provisión de alimentos). La aplicación de la termodinámica enriquece este abordaje al reconocer que el funcionamiento y la estructura de los agroecosistemas tienen límites que no son discutibles y que están impuestos por los flujos de energía que los organizan. La hipótesis a plantear es que ambas aproximaciones son complementarias, de manera que estimaciones independientes por una u otra vía deberían permitirnos diagnosticar estados parecidos en términos de deterioro o amenaza futura a la integridad del sistema. Mejorar el entendimiento de las relaciones entre la Física y la Ecología podrá llevarnos a probar la hipótesis de que los sistemas que son termodinámicamente menos eficientes son los que muestran mayor afectación de los servicios que provee el capital natural. La posibilidad de corroborar esta idea abre el camino a simplificar el estudio de los procesos involucrados usando a la energía, y la eficiencia de los procesos, como un indicador sistémico de deterioro.

BIBLIOGRAFÍA

Bakshi, B.R. 2002. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. Computers & Chemical Engineering 26:269-282.

Brown, M.T. y S. Ulgiati. 2004. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. Ecological Modelling 178:201 213.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, et al. 1997. The value of world's ecosystem services and natural capital. Nature 387:253-260.

Daily, G.C. 1997. Nature`s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, D.C. EE.UU.

Daily, G.C. 2000. Management objectives for the protection of ecosystem services. Environmental Science & Policy 3:333-339.

Dewulf, J. y H. Van Langenhove. 2005. Integrating industrial ecology principles into a set of environmental sustainability indicators for technology assessment. Resources, Conservation and Recycling 43:419-432.

Ferreyra, C. 2001. Emergy perspectives on the Argentine economy and food production systems of the Rolling Pampas during the twentieth century Graduate School. University of Florida, Florida. EE.UU.

Giampietro, M., G. Cerretelli y D. Pimentel. 1992. Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability. Agric. Ecosys. Environ. 38:212-244.

Hammond, G.P. 2007. Industrial energy analysis, thermodynamics and sustainability. Applied Energy 84:675-700.

Hau, J. L. y B.R. Bakshi. 2004. Promise and problems of emergy analysis. Ecological Modelling 178:215-225.

Jorgensen, S.E. 2007. Evolution and exergy. Ecological Modelling 203:490.

Jorgensen, S.E. y B.D. Fath. 2004. Application of thermodynamic principles in ecology. Ecological Complexity 1:267-280.

Jorgensen, S.E. y S.N. Nielsen. 1996. Application of ecological engineering principles in agriculture. Ecol. Eng. 7:373-381.

Kremen, C. 2005. Managing Ecosystem services: what do we need to know about their ecology? Ecology Letters 8:468-479.

Kumar, M. y P Kumar. 2008. Valuation of the ecosystem services: A psycho-cultural perspective. Ecological Economics 64:808-819.

Lomas, P.L., S. Álvarez, M. Rodríguez y C. Montes. 2008. Environmental accounting as a management tool in the Mediterranean context: The Spanish economy during the last 20 years. Journal of Environmental Management 88:326-347.

MA. 2005. Millenium Ecosystem Assessment, Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. Washington, D.C. EE.UU.

Merkle, A. y M. Kaupenjohann. 2000. Derivation of ecosystemic effect indicators - method. Ecological Modelling 130:39-46.

Odum, E.P. 1984. Properties of Agroecosystems. Pp. 5-11 en Lowrance, R., B.R. Stinner y G.J. House (eds.). Agricultural Ecosystems. Unifying Concepts. John Wiley and Sons. New York. EE.UU.

Odum, E.P. 1989. Input Management of Production Systems. Science 243:177-181.

Odum, E.P. 1996. Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making John Wiley & Sons, Inc. New York. EE.UU.

Odum, H.T. 2000. Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued In a Series of Folios. Folio 2. Emergy of Global Processes. Gainesville, Florida, EE.UU.

Odum, H.T., M.T. Brown y S.L. Brandt-Williams. 2000. Folio 1: Introduction and global budget. Handbook of Emergy Evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Gainesville, Florida, EE.UU.

Ortega, E. 2000. Handbook of Emergy Calculations. Sao Paulo, Brazil.

Pimentel, D. 1984. Energy Flow in Agroecosystems. Pp. 121-132 en Lowrance, R., B.R. Stinner y G.J. House (eds.). Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts. John Wiley & Sons, New York. EE.UU.

Pimentel, D., C. Wilson, C. McCullum, R. Huang, P. Dwen, et al. 1997. Economics and Environmental Benefits of Biodiversity. Bioscience 47:747-757.

Rótolo, G.C., T. Rydberg, G. Lieblein y C. Francis. 2007. Emergy evaluation of grazing cattle in Argentina's Pampas. Agriculture, Ecosystems & Environment 119:383-395.

Solow, R. 1986. On the Intergenerational Allocation of Natural Resources. Journal of Economics 88:141-149.

Solow, R.M. 1997. Georgescu-Roegen versus Solow-Stiglitz. Ecological Economics 22:267-268.

Starkermann, R. 1988. Social entropy, enthalpy, exergy and disergy in examples. Mathematical and Computer Modelling 10:409.

Stiglitz, J.E. 1997. Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. Ecological Economics 22:269-270.

Szargut, J., D.R. Morris y F.R. Steward. 1988. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Hemisphere Publishing Corporation, Berlin.

Tilman, D. 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. Proceedings of the National Academy of Sciences 96:5995-6000.

Tilman, D., K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor y S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418:671-677.

Turner, R.K., J. Paavola, P. Cooper, S. Farber, V. Jessamy, et al. 2003. Valuing nature: lessons learned and future research directions. Ecological Economics 46:493-510.

Ulgiati, S., S. Bargigli y M. Raugei. 2007. An emergy evaluation of complexity, information and technology, towards maximum power and zero emissions. Journal of Cleaner Production 15:1359-1372.

Wall, G. 2002. Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society. Energy Conversion and Management 43:1235.

Zhang, W., T.H. Ricketts, C. Kremen, K. Carney y S.M. Swinton. 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. Ecological Economics 64:253-260.